

АЗИМУТАЛЬНЫЙ АПЕРТУРНЫЙ СИНТЕЗ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

Б. С. Минченко

Предложен алгоритм обработки радиокарт, полученных из наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 методом азимутального синтеза. Приведен пример практического синтеза реального радиоастрономического объекта.

An algorithm of processing radiomaps obtained from the observations with the radio-telescope RATAN-600 using the passive azimuthal aperture synthesis method is proposed. An example of the practical synthesis of the image of a real radioastronomical object is given.

Последовательный азимутальный апертурный синтез является одним из основных режимов работы радиотелескопа РАТАН-600, позволяющим получать радиоизображения источников с высоким угловым разрешением по обеим координатам. Использование различных азимутов при наблюдениях одного и того же источника приводит к изменению ориентации диаграммы направленности радиотелескопа относительно системы координат, связанной с данным источником. Так как вертикальный размер диаграммы радиотелескопа РАТАН-600 существенно больше ее горизонтального размера (за исключением работы вблизи зенита с полным отражателем), то, изменяя ориентацию диаграммы, тем самым получаем высокие разрешения в различных направлениях по исследуемому источнику.

Возможны две модификации азимутального синтеза. В настоящей работе рассматривается так называемый пассивный синтез, при котором движение диаграммы радиотелескопа относительно объекта осуществляется лишь за счет суточного вращения последнего. Ввиду малых угловых размеров подавляющего большинства радиоастрономических объектов можно полагать, что траектория движения диаграммы по объекту при наблюдениях в любом азимуте является прямой линией, параллельной оси ξ (рис. 1). При неподвижной диаграмме имеем, следовательно, пространственно-инвариантную задачу, для которой

$$T_a(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x - \xi, y - \eta) T_b(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (1)$$

где T_a — измеряемое распределение; T_b — истинное распределение; A — диаграмма направленности по мощности; ξ, η — прямоугольные координаты.

В самом общем случае, когда в результате наблюдений имеем некоторый нерегулярный набор прохождений объекта в ряде азимутов, задача определения T_b решается методом наименьших квадратов, причем для режима азимутального синтеза (последовательное во времени поступление информации) особенно удобен рекуррентный вариант метода. Соответствующий алгоритм можно найти, например, в [1].

В большинстве практических случаев методика наблюдений при азимутальном синтезе состоит в получении регулярного (т. е. с постоянным шагом по углу места) набора сечений для каждого азимута, т. е. осуществляется синтез некоторого числа I парциальных карт (I — число используемых азимутов), каждая из которых является сверткой объекта с данной парциальной диаграммой. Шаг по углу места для каждой парциальной карты должен удовлетворять теореме отсчетов, т. е. в нашем случае

$$\Delta y_i \leq \frac{1}{2V_i},$$

где V_i — граничная синтезированная частота в направлении V для i -го азимута.

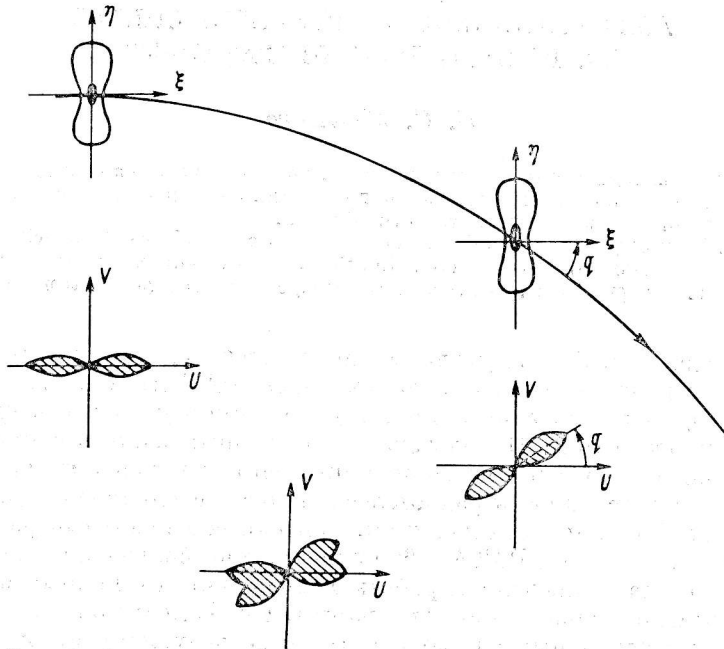


Рис. 1. Схема пассивного азимутального апертурного синтеза.

Аналогично шаг дискретизации сканов Δx_i должен выбираться из условия

$$\Delta x_i \leq \frac{1}{2U_i}.$$

Практически все парциальные карты, как правило, имеют одинаковый Δx_i , определяемый частотой опроса каналов в системе регистрации.

Радиотелескоп РАТАН-600 имеет 12 фиксированных (через 30°) азимутов наблюдений, и, следовательно, для объекта со склонением δ имеем определенный набор позиционных углов q_i , величины которых получаются из решения известного параллактического треугольника (см. например, [2]), а также определенный набор углов места для каждого азимута. Таким образом, для каждого используемого азимута имеем цифровую карту T_{ai} со своей определенной полосой прозрачности антенного фильтра, ориентация которой на $U-V$ -плоскости, а также ее форма и граничные частоты определяются позиционным углом и склонением источника.

Дискретный синтез I парциальных карт T_{ai} дает «синтетическую» карту T_{ac} :

$$T_{ac}(x, y) = \sum_{i=1}^I T_{ai}(x, y). \quad (2)$$

Карте T_{as} в силу принципа линейности соответствует некоторая «синтетическая» диаграмма A_s , которая получается дискретным синтезом I парциальных диаграмм A_i :

$$A_s(x, y) = \sum_{i=1}^I A_i(x, y). \quad (3)$$

Очевидно, что и синтетическая передаточная функция $\bar{A}_s = {}^2FA_s$ (2F — оператор двумерного преобразования Фурье) также получается дискретным синтезом парциальных передаточных функций \bar{A}_i :

$$\bar{A}_s(U, V) = \sum_{i=1}^I \bar{A}_i(U, V). \quad (4)$$

Так как при дискретном синтезе всех \bar{A}_i происходит, как ясно из рис. 1, расширение синтетической полосы прозрачности, то, очевидно, объединяя парциальные карты, мы тем самым получаем карту с улучшенным разрешением.

При недостаточном заполнении $U-V$ -плоскости для синтетической карты T_{as} последняя подобно парциальным картам T_{ai} будет нуждаться в коррекции. Предлагается использовать тот же метод коррекции, что и для парциальных карт [3, 4]. Разложение исходной карты T_{as} должно производиться теперь по синтетическим диаграммам A_s :

$$T_{as}(x, y) = \sum_{i=1}^N A_s(x - x_i, y - y_i) S_i(x_i, y_i) + T_0(x, y), \quad (5)$$

где N — число итераций, определяемое в процессе разложения; S_i — весовые коэффициенты; T_0 — остаточное изображение.

Результатом коррекции является чистая карта T_c , описываемая обычной моделью:

$$T_c(x, y) = \sum_{i=1}^N A_c(x - x_i, y - y_i) S_i(x_i, y_i) + T_0(x, y), \quad (6)$$

где A_c — фиктивная диаграмма желаемого вида (чистая диаграмма).

Предлагаемый ниже алгоритм машинной обработки наблюдений для режима пассивного азимутального синтеза разделяется на следующие этапы.

Синтез T_{as} по набору T_{ai} . Прежде всего необходимо выполнить первичную обработку данных и приведение их к одинаковому масштабу антенных температур. Для возможности дискретного синтеза парциальных карт по (2) последние должны быть пересчитаны на некоторую опорную сетку. Величины дискретов этой сетки по обеим осям должны удовлетворять условиям:

$$\Delta x \leq \frac{1}{2U_c}; \quad \Delta y \leq \frac{1}{2V_c},$$

где U_c, V_c — граничные синтезированные частоты синтетического антенного фильтра.

При пассивном синтезе все парциальные сетки имеют одинаковую ориентацию, что приводит (учитывая постоянство величины Δx) к простой интерполяции по y при пересчете. Так как T_{ai} является функцией с ограниченной шириной спектра, то для точного восстановления T_{ai} в промежуточных сечениях применяем интерполяционную формулу Уитакера—Котельникова. Таким образом, для сечения y_0 опорной сетки каждая точка парциальной карты $T_{ai}(x, y_0)$ рассчитывается по формуле

$$T_{ai}(x, y_0) = \sum_{i=1}^L T_{ai}(x, y_i) \cdot \frac{\sin \pi [(y_0 - y_i)/\Delta y]}{\pi [(y_0 - y_i)/\Delta y]}, \quad (7)$$

где Δy — шаг парциальной карты по углу места; L — число сечений парциальной карты; y_i — ординаты сечений парциальной карты.

Коэффициенты в (7) одинаковы для всех значений x , т. е. достаточно вычислить их один раз для данной строки.

Предварительная оценка качества синтезированного изображения.

По конфигурации синтетической полосы прозрачности можно определить степень заполнения $U-V$ -плоскости, иначе говоря, процент ее «дырявости». Согласно [5], максимальный возможный боковой лепесток равен $n_{UV}/(N_{UV}-n_{UV})$, где N_{UV} — общее число независимых ячеек на $U-V$ -плоскости; n_{UV} — число незаполненных ячеек на $U-V$ -плоскости, а среднеквадратичный уровень далеких лепестков —

$$\frac{\sqrt{n_{UV}/2}}{N_{UV}-n_{UV}}.$$

Вычислив площадь синтетической полосы прозрачности $N_{UV}-n_{UV}$ ($N_{UV} = \pi D^2/\lambda^2$ в нашем случае), можно по приведенным выражениям оценить ожидаемые уровни боковых лепестков. Следует отметить, что данные оценки являются мажорирующими, т. е. фактический уровень лепестков всегда значительно меньше. На основании получившихся оценок и с учетом специфики данной радиоастрономической задачи на этом этапе может быть принято решение о прекращении дальнейшей обработки.

Расчет синтетической диаграммы A_s и определение реального уровня боковых лепестков. Для расчета A_s необходимо знать A_i , для определения которых используется алгоритм [6]. Следует отметить, что вычисленные A_i задаются на сетках с различной ориентацией. Пересчет их на опорную сетку, которая должна совпадать с опорной сеткой для T_{as} , осуществляется с помощью простой линейной интерполяции (благодаря чему резко снижается объем вычислений). Непосредственно определяются уровни боковых лепестков и исходя из этого уточняется решение о необходимости коррекции (чистки) карты T_{as} .

Чистка синтетической карты. Производится по программе, составленной автором и применяемой для чистки парциальных карт. Чистая диаграмма A_s выбирается в виде двумерной гауссианы, причем ее размеры по половинному уровню должны совпадать с соответствующими размерами главного лепестка синтетической диаграммы. Тем самым отражается реальное заполнение $U-V$ -плоскости. Выбор параметров чистки (весового коэффициента S_1 , числа членов разложения N) такой же, как в [4].

Блок-схема алгоритма показана на рис. 2.

Приведем теперь пример обработки реального радиоастрономического объекта по предложенной методике.

Первые наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600 с использованием азимутального синтеза были проведены весной 1978 г. после ввода в эксплуатацию восточного сектора. Тем самым стали доступными для наблюдений три азимута: 210, 240 и 270°. В качестве объекта исследования была выбрана радиогалактика ЗС 111. Картографирование этого источника в меридиане было выполнено Н. С. Соболевой. На рис. 3 показана карта ЗС 111 на волне 3.9 см, построенная по результатам наблюдений. Источник довольно слабый ($T_{a \max} < 1$ К), поэтому применялись повторные наблюдения с последующим усреднением записей. Первичная обработка включала сглаживание усредненной записи и исправление за постоянную времени интегрирующей цепочки.

Рис. 4 — очищенная карта ЗС 111, на которой хорошо видны три известные компоненты источника. Изофоты на картах проведены через 10%-ные уровни. Заштрихованная область на рис. 4 показывает сечение чистой диаграммы по половинному уровню. Его размеры $24 \times 90''$. Масштабы по осям отличаются в 1.7 раза (изофоты выводились прямо на АЦПУ, печатные символы имеют различные ширину и высоту).

Рис. 5 — синтетическая карта ЗС 111, полученная дискретным синтезом карты рис. 3 и двух других карт, снятых в азимутах 210 и 270°, что соответствует позиционным углам 27 и 67° соответственно. Азимут 240°

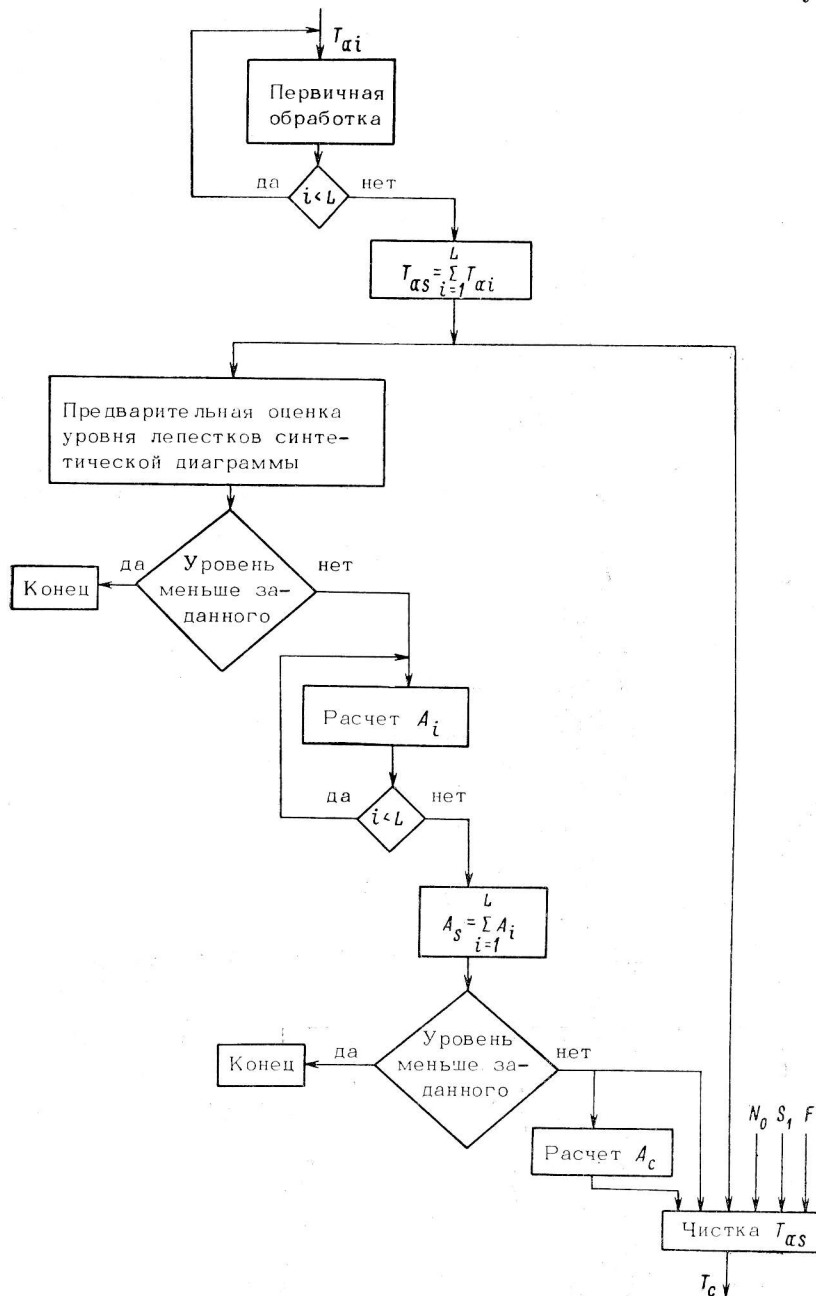


Рис. 2. Блок-схема алгоритма машинной обработки данных при пассивном азимутальном синтезе.

не использовался, так как разность моментов кульминаций для 210 и 240° составляла около 16 мин, что не позволяло осуществить необходимую перестройку отражателя антенны. Поскольку шаг по углу места при наблюдениях в меридиане $\Delta\delta_m$ был взят значительно меньше собственного интервала, то при составлении программы наблюдений для азимутов оказалось возможным выбрать шаги по углу места $\Delta\delta_a$ из $\Delta\delta_a = \Delta\delta_m / \cos q$,

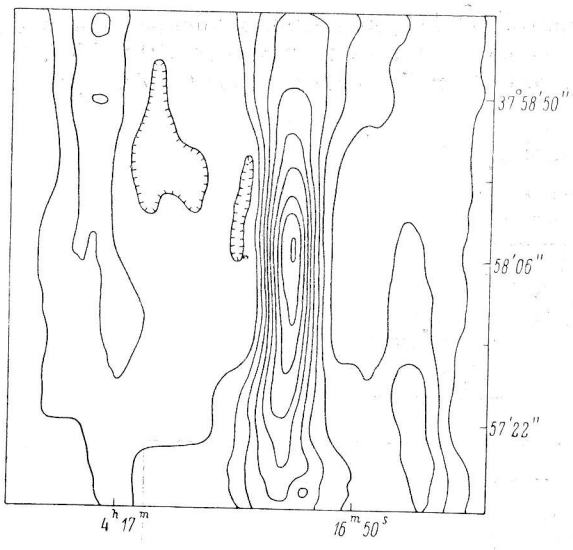


Рис. 3. «Грязная» карта источника ЗС 111 в меридиане ($A=180^\circ$).

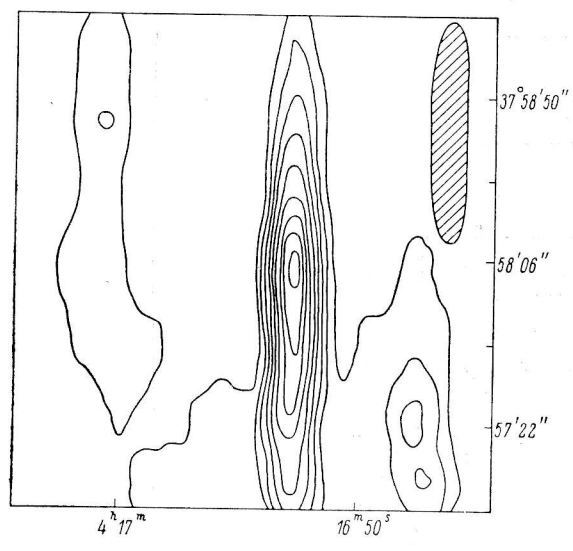


Рис. 4. Очищенная карта ЗС 111 в меридиане ($A=180^\circ$).

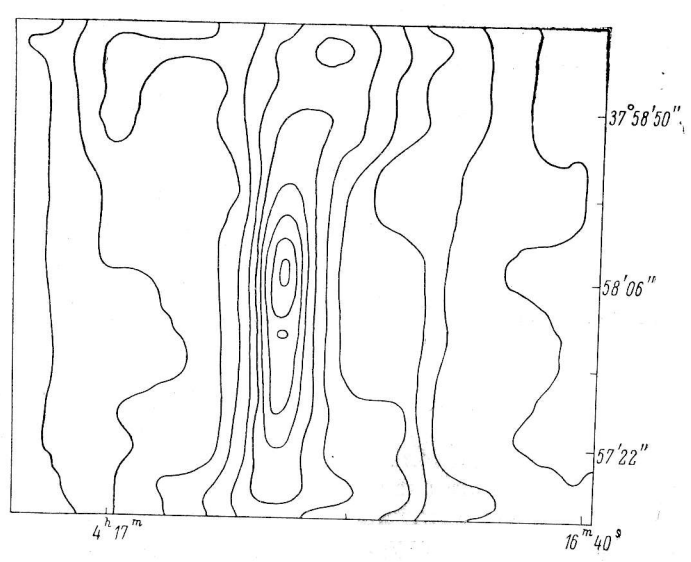


Рис. 5. Синтетическая «грязная» карта ЗС 111.

где q — позиционный угол. При этом $\Delta\delta_a$ не превысили соответствующих собственных интервалов. Так как $\Delta\alpha$ на всех картах взят одинаковым (все парциальные сетки совпали по строкам и столбцам), в данном случае вообще отпала необходимость в интерполяции карт по (7). Необходима лишь временная привязка всех сеток.

На рис. 6 показаны рассчитанная синтетическая диаграмма и соответствующая ей синтетическая полоса прозрачности. Заполнение $U-V$ -плоскости здесь менее 50%, что по оценкам [5] соответствует уровню максимального бокового лепестка порядка 30%. Реальный уровень, определявшийся по диаграмме, составил около 15%, и, следовательно, необходимость чистки карты очевидна.

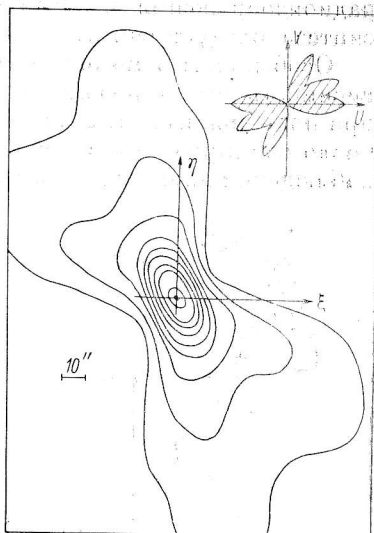


Рис. 6. Синтетическая диаграмма и полоса прозрачности для карты рис. 5.

На рис. 7 показана очищенная синтетическая карта ЗС 111. Заштрихованная область — сечение чистой диаграммы по половинному уровню. Его размеры $24 \times 42''$; таким образом, угловое разрешение по δ улучшилось в 2.1 раза. Сравнивая карту с рис. 4, полученным лишь из меридианных наблюдений, видим, что произошло более четкое разделение трех известных компонент и появление двух дополнительных компонент.

Изменилась в соответствии с формой синтетического чистого луча форма компонент. Одна из дополнительных компонент в какой-то степени намечается и на рис. 4, но отсюда трудно судить о ее достоверности. На месте

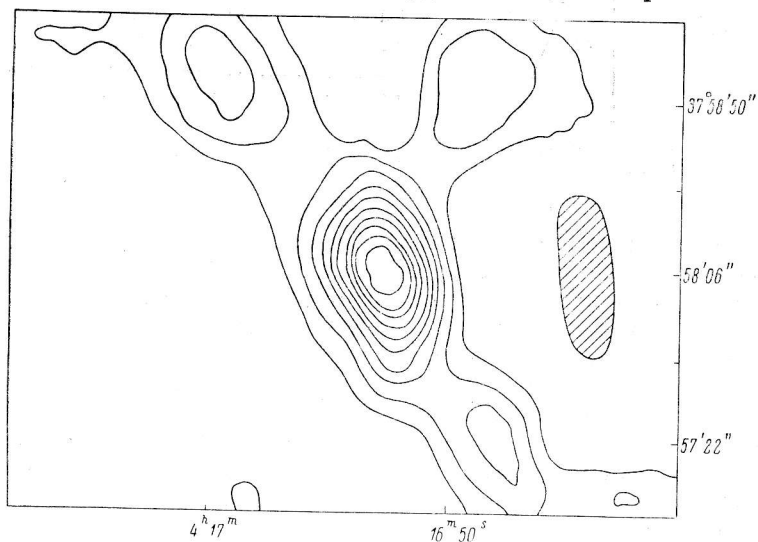


Рис. 7. Очищенная синтетическая карта ЗС 111.

другой новой компоненты на рис. 4 имеется весьма слабая деталь с уровнем около 4%, которая не обозначена изофотами (последние проводились через 10%-ные уровни). Сравнивая карту рис. 7 с картой ЗС 111, синтезированной на Кембриджском одномильном радиотелескопе на 408 МГц [7], можно заметить достаточно хорошее соответствие между ними. В частности, на кембриджской карте имеются все пять компонент, их позиции на обеих картах совпадают. Следует отметить, что невысокое отношение сигнал/

шум при наблюдениях в азимутах и ошибки расчета диаграмм могли привести к некоторому повышению уровня дополнительных компонент источника, но, тем не менее, по мнению автора, первую попытку построения радиоизображения на РАТАН-600 методом азимутального апертурного синтеза следует считать успешной.

Особенностью метода пассивного азимутального синтеза является зависимость числа необходимых сканирований от азимута. В частности, при позиционных углах, близких к 90° , оно может значительно превысить число сканирований в меридиане. В то же время минимизация времени наблюдений является одним из важнейших эксплуатационных требований,

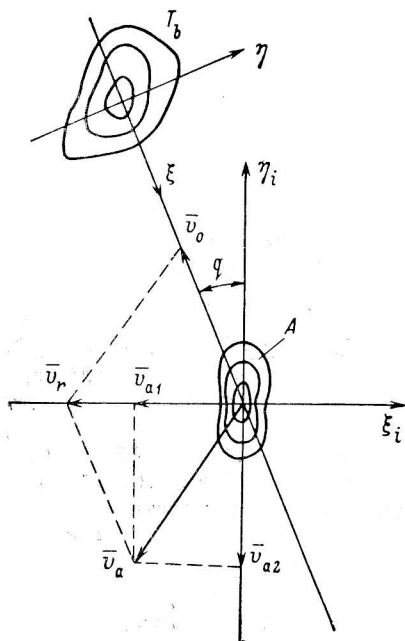


Рис. 8. Схема активного азимутального синтеза.

особенно применительно к режиму азимутального синтеза, при котором длительность цикла наблюдений может достигнуть нескольких месяцев. Повышение временной эффективности может быть получено в методе так называемого активного азимутального синтеза, при котором диаграмма должна перемещаться в пространстве за счет перестройки отражателя таким образом, чтобы результирующее движение диаграммы происходило перпендикулярно к ее большой оси. Минимизация достигается увеличением интервала между отдельными прохождениями (при этом должно соблюдаться условие теоремы отсчетов), а также, если размеры объекта позволяют, и несколькими прохождениями через диаграмму за единичное наблюдение, как в методе быстрого картографирования [8].

На рис. 8 показан объект, движущийся через неподвижную диаграмму A по прямой $\eta=0$ (суточное вращение) со скоростью \bar{v}_0 . Диаграмма должна перемещаться по объекту со скоростью \bar{v}_r , причем для равенства

масштабов меридианной карты и азимутальных карт $|\bar{v}_r| = |\bar{v}_0|$ (в противном случае необходимо производить преобразование данных). Зная \bar{v}_0 и q , легко определить вектор скорости активного движения диаграммы \bar{v}_a . Конструкция РАТАН-600 позволяет перемещать облучатель в двух ортогональных направлениях. Разложив \bar{v}_a , можно определить скорости перестройки отражателя (скорости движения каретки, вторичного зеркала, элементов главного зеркала).

Метод активного синтеза может быть применен не к слишком большим объектам, так как пределы движения диаграммы в горизонтальном направлении ограничены. Временной выигрыш, даваемый активным методом, зависит от позиционного угла q и максимален при $q=90^\circ$. В самом деле, при $q=90^\circ$ для исследования объекта с размерами L_α, L_δ по α и δ соответственно необходимое число сканов при пассивном синтезе

$$N_p = \frac{L_\delta}{\left(\frac{1}{2} \frac{\lambda}{D}\right)},$$

а при активном

$$N_a = \frac{L_\alpha}{\left(\frac{1}{2} \frac{\lambda}{H}\right)}.$$

Их отношение:

$$\frac{N_p}{N_a} = \frac{D L_\delta}{H L_\alpha}$$

Так как L_α не может быть слишком велико, т. е. форма площадки близка к квадратной, то даже без учета возможности повторных проходов за один сеанс наблюдений выигрыш составляет D/H . Для угла места 45° $D/H \approx 4$, т. е. получаем как минимум четырехкратную экономию времени.

Практически активный синтез может быть применен лишь по завершении автоматизации РАТАН-600, поскольку управление перестройкой отражателя антенны должно осуществляться с помощью ЭВМ. Обработка наблюдений существенно усложнится, поскольку будем иметь пространственно-неинвариантную задачу.

В заключение автор выражает признательность М. Н. Наугольной за помощь в проведении наблюдений и Н. С. Соболевой и Ю. Н. Парийскому за полезные обсуждения работы.

Список литературы

1. А о к и М. Оптимизация стохастических систем. М., «Наука», 1971.
2. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н. Методы радиоастрономического использования РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 13—39.
3. Н ö g b o m J. A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines. — Astronomy and Astrophysics Suppl., 1974, 15, p. 417—426.
4. Минченко Б. С. Коррекция радиоизображений при картографировании на РАТАН-600. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1977, 9, с. 38—46.
5. Е с е п к и н а Н. А., К о р о л ь к о в Д. В., П а р и й с к и й Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1973. 415 с.
6. Г е л ь ф р е й х Г. Б. Об одном алгоритме расчета диаграммы направленности антенны РАТАН-600. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1977, 9, с. 89—98.
7. М а с к а у С. D. Observations of the structure of radio sources in the 3C Catalogue. II. — Monthly Notices Royal Astronom. Soc., 1969, V. 145.
8. М и н ч е н к о Б. С. Быстрое картографирование на радиотелескопе РАТАН-600. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1977, 10, с. 99—107.